

Yumuşak Zemin Model Parametrelerinin Zemin Davranışına Etkisi

Firdevs UYSAL*¹, Baki BAĞRIAÇIK², Abdulazim YILDIZ²

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Niğde

²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 09.11.2017

Kabul tarihi: 14.03.2018

Öz

Kil gibi yumuşak zeminler yüksek poroziteye sahiptir ve diğer zemin türleri ile karşılaştırıldığı zaman yüksek sıkışabilirlik göstermektedir. Ödometre deneyinde, normal konsolide killer normal konsolide kumlara göre on kat daha yumuşak davranmaktadır [1]. Kil zeminler çok düşük permeabiliteye sahiptir ve permeabilite konsolidasyon oranının idaresinde oldukça önemlidir. Bu çalışmada ilk olarak yumuşak kilin birincil konsolidasyon davranışı büyük ölçekli bir laboratuvar oedometre deneyi kullanılarak incelenmiştir. Yumuşak kili temsil etmesi için yeniden yapılandırılmış kaolin kili kullanılmıştır. Kaolin tozu likit limitin 1,5 katı kadar su ile karıştırılarak 30kPa değerinde bir eksenel basınç ile konsolide edilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında, klasik laboratuvar deneylerinden elde edilen zemin parametrelerinin, yumuşak zemin davranışına etkisi Plaxis 2D sonlu eleman hesapları ile araştırılmıştır. Sonlu eleman hesaplarında Yumuşak Zemin Modeli kullanılmıştır ve model parametreleri standart laboratuvar deneylerinden elde edilmiştir. Simulasyonlar uygun model parametrelerinin belirlenmesinin yumuşak zemin davranışının modellenmesinde oldukça büyük bir öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Konsolidasyon, Modelleme, Oedometre deneyi, Plaxis, Yumuşak zemin modeli

Effect of Soft Soil Model Parameters on Soil Behavior

Abstract

Soft soils such as clays have a high porosity and demonstrate a high compressibility compared to other type soils. In oedometer testing, normally consolidated clays behave up to ten times softer than normally consolidated sands [1]. Clay soils have very low permeability which is highly important to govern consolidation rate. In this study, first task has been to investigate the primary consolidation behaviour of soft clay by using a large-scale laboratory oedometer test. The reconstituted specimen of kaolin clay was used to represent the soft clay. The kaolin powder was mixed at a water content of about 1.5 times the liquid limit and has been consolidated by the axial stress of 30kPa. Secondly, the effect of the soil parameters obtained from standard laboratory tests on soft clay behaviour was researched with numerical finite element analysis computations in Plaxis 2D. Soft Soil material model was utilized during the finite element computations and input parameters were calculated from standard laboratory tests. The simulations demonstrate that it is very important to determine appropriate model parameters for modelling soft soil behaviour.

Keywords: Consolidation, Modelling, Oedometer test, Plaxis, Soft soil model

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Firdevs UYSAL, firdevsuysal@ohu.edu.tr

1. GİRİŞ

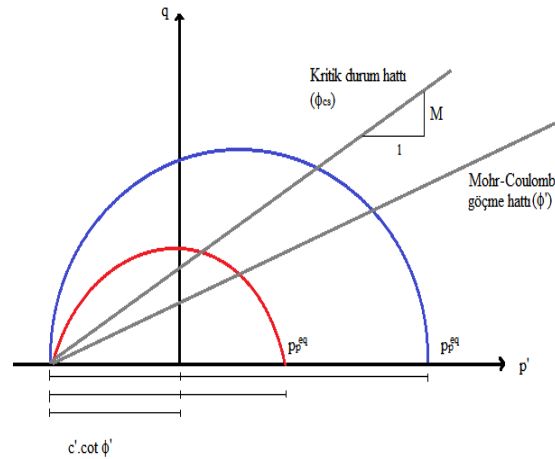
Kil, siltli kil ve bataklık gibi yumuşak zeminlerin davranışının modellenmesi geoteknik mühendisliğin en karmaşık problemlerindedir. Yumuşak zemin üzerinde yer alan yapıların tasarımı proje ve uygulama mühendisleri için çoğu kez sorun teşkil etmektedir. Çünkü yumuşak killer düşük dayanıma sahiptir ve yüksek sıkışma potansiyeli vardır. Ayrıca yükleme durumunda zeminlerin mekanik davranışında yüksek derecede lineer olmayan davranış hakimdir ve meydana gelen deformasyonlar zamana bağlı olarak gerçekleşir. Yumuşak zeminlerin zamana bağlı davranışı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [2-6]. Malzemelerin doğal ortamlardaki davranışlarının sonlu elemanlar yaklaşımı ile modellenmesi zemin modelleri ile yapılır. Bu modeller, gerilmeyi deformasyon geçmişinin bir fonksiyonu olarak tanımlar. Geoteknik malzeme davranışı genellikle gerilme bağımlıdır, ancak saha ve laboratuvar ortamlarında zemin davranışı oldukça basitleştirilmekte ve gerilmeden bağımsız olmaktadır. Yumuşak zeminler için geliştirilen zemin modelleri genellikle kritik durum teorisini esas almakta olup bu modellerin ilki Cam Kili (CC) zemin modeli olarak kabul edilmektedir. Roscoe ve Schofield [7], tarafından önerilen CC zemin modeli izotropik bir zemin modeli olup, killerdeki elasto-plastik davranışı esas almaktadır. Roscoe ve Burland [8], tarafından bu model geliştirilmiş ve Modifiye Cam Kili (MCC) olarak adlandırılmıştır. CC ve MCC modelleri, izotropik (hidrostatik) gerilme koşullarında ($\sigma'_1 = \sigma'_2 = \sigma'_3 = p'$), $v - \ln p'$ düzleminde elde edilen sıkışma eğrisini esas alarak hacimsel ve kayma deformasyonlarını hesaplar.

Bu çalışmanın ilk aşamasında yumuşak kilin birincil konsolidasyon davranışı büyük ölçekli ödometre deneyi kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde yumuşak kili temsil etmesi için yeniden yapılandırılmış kaolin kili kullanılmıştır. Deneyde dört kademe yüklemesi yapılmış olup, numune üzerine toplamda 200kPa değerinde bir basınç uygulanmıştır. Her bir yüklemesi kademesinde boşluk suyu basıncının

tamamen sönümlenmesi için yaklaşık 48 saat beklenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında zemin model parametrelerinin yumuşak zemin davranışına etkisini araştırmak için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde sonlu elemanlar yöntemi kullanarak büyük ölçekli laboratuvar ödometre deneyinin 2 boyutlu (2D) simülasyonu yapılmıştır. Analiz sonuçları ve büyük ölçekli laboratuvar ödometre deney sonuçları karşılaştırılarak sayısal analizler doğrulanmıştır. Analizlerde Yumuşak Zemin Modeli kullanılmış olup, model parametreleri yeniden yapılandırılmış yumuşak kil zeminde yapılan klasik laboratuvar deneylerinden elde edilmiştir. Çalışma, zemin parametrelerinin doğru bir şekilde seçilmesinin yumuşak zemin davranışının modellenmesinde oldukça büyük bir öneme sahip olduğunu göstermiştir.

2. YUMUŞAK ZEMİN MODELİ

SSM modelin MCC modelinden farkı, akma yüzeyi üzerinde Mohr-Coulomb göçme kriterini esas almasıdır (Şekil 1). SSM'de akma yüzeyinin denklemi Eşitlik 1 ile ifade edilmektedir.

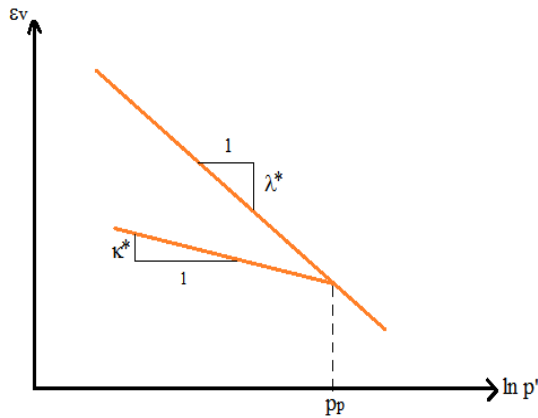


Şekil 1. SSM'nin akma yüzeyi [10]

$$f = q^2 - M^2(p'_m - p') (p + \cot \varphi') = 0 \quad (1)$$

p'_m parametresi zeminin izotropik ön konsolidasyon basıncıdır ve akma yüzeyinin

boyutunu ifade eder. p - q düzleminde M eğimine sahip doğru elips şeklindeki akma yüzeyinin tepe noktasından geçer ve elipsin yüksekliğini tanımlar. M , kritik durum hattını ifade eder ve maksimum göçme gerilmesi sonrası durumu modeller. İzotropik gerilme koşullarında p' ile hacimsel deformasyon ε_v arasında logaritmik bir ilişki vardır (Şekil 2). MCC modelinden farklı olarak özgül hacim (v) yerine hacimsel deformasyon (ε_v) kullanıldığı için λ' 'nin yerini Modifiye Sıkışma İndisi λ^* almıştır [9].



Şekil 2. İzotropik gerilme koşullarında ortalama efektif gerilme ile hacimsel deformasyon arasındaki ilişki

İzotropik sıkışma için akma yüzeyi Eşitlik 2 ile ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_v - \varepsilon_{v0} = \lambda^* \ln \left(\frac{p'}{p_0} \right) \quad (2)$$

İzotropik boşaltma ve yeniden yükleme durumunda elastik hacimsel deformasyonlar Eşitlik 3 ile tanımlanmaktadır.

$$\varepsilon_v^e - \varepsilon_{v0}^e = \kappa^* \ln \left(\frac{p'}{p_0} \right) \quad (3)$$

Modifiye Şişme İndisi (κ^*) zeminin boşaltılması ve yeniden yüklenmesi davranışını tanımlar. Bu davranış Hooke kanunu ile açıklanır ve zeminin elastik olduğu kabul edilir. Gerilmeye bağlı tanjant rijitlik modülü Eşitlik 4 ile ifade edilebilir.

$$E_{ur} = 3(1 - 2\nu_{ur}) \frac{p'}{\kappa^*} \quad (4)$$

κ^* ve ν_{ur} parametreleri elastik deformasyonların hesaplanmasında kullanılır. SSM esas olarak beş adet zemin parametresi ile idare edilmektedir. Bu parametreler;

λ^* : Modifiye sıkışma indisi

κ^* : Modifiye şişme indisi

c : Kohezyon

φ : İçsel sürtünme açısı

ψ : Dilatasyon açısı

ν_{ur} : Poisson oranı (yükleme veya boşaltma için),

$K_{o^{nc}}$: Normal konsolide durumundaki yatay gerilme katsayısıdır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

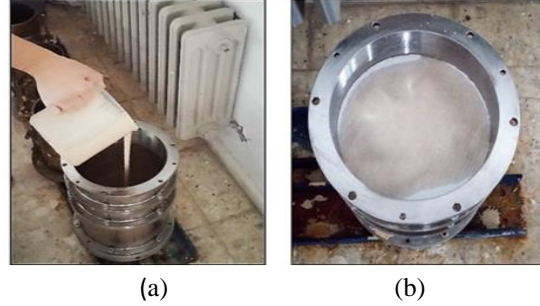
Bu çalışmanın ilk aşamasında yumuşak kilin birincil konsolidasyon davranışı büyük ölçekli bir laboratuvar ödometre hücresi (hücre çapı: 20 cm, hücre yüksekliği: 15 cm) yardımı ile deneysel olarak incelenmiştir. Bu deney hücresi klasik konsolidasyon deneyine benzer bir çerçeve içine yerleştirilmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Büyük ölçekli laboratuvar ödometre hücresi ve yükleme düzeneği

Yumuşak kili temsil etmesi için yeniden yapılandırılmış kaolin kili kullanılmıştır. Kile yeniden yapı kazandırabilmek için toz halindeki kaoline, likit limitinin (%38) 1,50 katı olan %57 oranında su ilave edilmiştir. Bu prosedür bir çok çalışmada [11-13] kullanılmıştır. Ayrıca, Cimetada ve arkadaşları [14], bu şekilde zemin ortamının tamamen doygunluğunun sağlanacağı ve homojen bir yapı elde edilebileceğini belirtmiştir.

Karıştırıcı yardımı ile kil ve su karıştırılarak akışkan bir zemin oluşturulmuştur (Şekil 4.a). Akışkan zemin deney hücresinin içine boşaltılmadan önce hücre iç duvarı ince bir yağ tabakası ile kaplanarak zemin ve hücre arasında oluşacak sürtünmelerin azaltılması sağlanmıştır. Deney hücresinden suyun çıkışı konsolidasyon deneyine benzer olarak çift yönlüdür. Hücre tabanından ve yüzeyinden suyun drenajını kolaylaştırmak için hücre tabanına ve numune yüzeyine poroz kâğıtlar yerleştirilmiştir (Şekil 4.b). Akışkan zemin üzerine kademeli yük artışları ile toplamda 30 kPa değerinde bir ön yükleme yapılarak kil zeminin yeniden yapı kazanması sağlanmıştır (Şekil 5). Ön konsolidasyon sürecinin tamamlanması 10 (on) gün sürmektedir. Bu aşamadan sonra numune esas deney yüklemesi olan birincil konsolidasyon yüklemeleri için hazır hale gelmiştir. Bu yükleme öncesinde suyun tahliyesini sağlamak için numune üzerindeki poroz kağıt üzerine 10mm kalınlığında kum tabakası serilmiştir. Kum tabakanın üzerine model temel koyularak hücre yükleme düzeneğine yerleştirilmiştir. Deney yüklemesi için her bir yükleme kademesinde moment koluna 30 kg ağırlığındaki sabit yükler uygulanarak numuneye yükleme yapılmıştır. Bu yükleme ile her bir basınç kademesinde hücreye 50 kPa değerinde basınç uygulanmaktadır. Dört kademe tamamlanan yüklemenin her bir kademesinde boşluk suyu basıncının tamamen sönümlenmesi için yaklaşık 48 saat beklenmiştir ve hücreye toplamda 200 kPa değerinde bir basınç uygulanmıştır. Deneyler klasik laboratuvar konsolidasyon deneylerinde olduğu gibi suya doygun koşullarda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Deney numunesinin hazırlanması

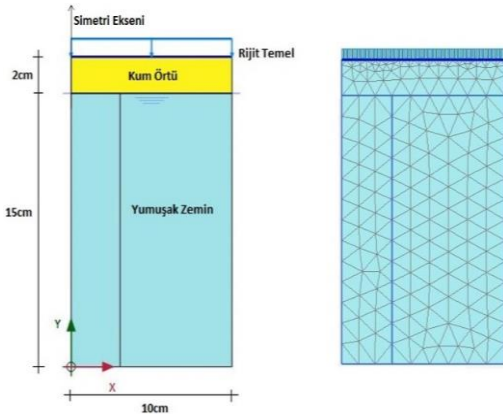


Şekil 5. Zemine ön konsolidasyon basıncının uygulanması

4. SAYISAL ÇALIŞMALAR

Herhangi bir geoteknik problemin ya da deney sisteminin sayısal modelinin oluşturulabilmesi için sistemin geometrisinin, yükleme koşullarının ve malzeme parametrelerinin doğru seçilmesi oldukça büyük önem arz etmektedir. Çalışmanın bu bölümünde sayısal modelde kullanılan zemin model parametrelerinin zemin davranışına etkisini araştırmak için sayısal parametrik çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda laboratuvar ortamında gerçekleştirilen büyük ölçekli laboratuvar oedometre deneyi sayısal olarak modellenmiştir. Sayısal model Plaxis 2D [15] bilgisayar programı ile iki boyutlu koşullarda gerçekleştirilmiştir. Model oluşturulurken laboratuvar deneyinin boyutları ve yükleme koşulları birebir uygulanmıştır (Şekil 6). Eksenel simetrik model kullanılarak deney hücresinin yarısı

modellenmiştir. Modelin yan yüzeylerinde yanal yöndeki hareket tutularak sadece düşey yönde harekete izin verilmiştir ($u_x=0$, $u_y \neq 0$). Suyun drenajı model deneyde olduğu gibi sadece hücre tabanı ve hücre yüzeyinden sağlanmıştır. Yükleme rijit temel yardımı ile üniform olacak şekilde her yük kademeleri için, deneysel çalışmadaki yük kademeleri ile aynı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde SSM zemin modeli kullanılarak, yumuşak zeminin zamana bağlı davranışı araştırılmıştır. SSM parametreleri, yeniden yapılandırılmış yumuşak zemin üzerinde gerçekleştirilen klasik laboratuvar deneyleri yardımı ile belirlenmiştir. Sayısal analiz sonuçları laboratuvar deney sonuçları ile karşılaştırılarak analiz sonuçlarının deney sonuçlarına yakınlığı araştırılmış ve parametrelerin davranış üzerindeki etkisi incelenmiştir.



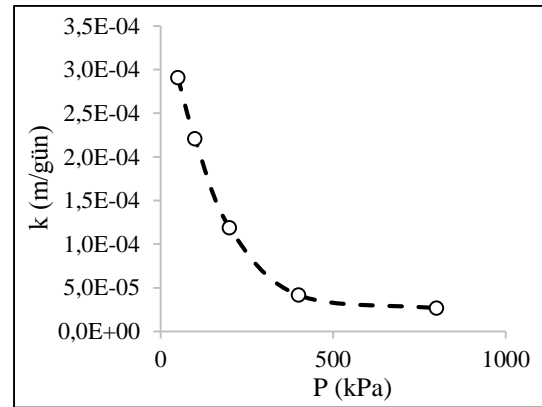
Şekil 6. Laboratuvar deney modeli ve sonlu elemanlar ağı

5. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Çalışmanın bu bölümünde sayısal modellemede kullanılan SSM parametrelerinin zemin davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek için sayısal parametrik çalışmalar yapılarak deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Zemin parametreleri farklı başlıklar altında incelenerek değerlendirilmiştir. Bu kısımda gerçekleştirilen çalışmalar laboratuvar deneyinin dört yükleme kademesi için de yapılmış olup, çalışmada bazı tipik karşılaştırma eğrileri verilmiştir.

5.1. Permeabilite Etkisi

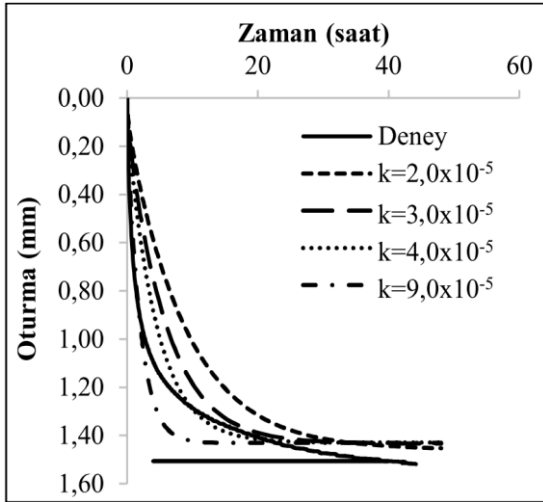
Zemine konsolidasyon oturmalarının tamamlanma süresi ve boşluk suyu basıncı değişimi önemli derecede permeabilite ile kontrol edilir. Yeniden yapılandırılmış yumuşak zemin için gerçekleştirilen klasik konsolidasyon deneyleri incelendiği zaman permeabilitenin her basınç kademesinde aynı olmadığı, artan basınç kademeleri ile bu değerin azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 7). Permeabilitenin yükleme kademeleri ile değişmesi ile sayısal analizlerde her basınç kademesi için farklı bir permeabilite değeri kullanılmalıdır.



Şekil 7. Permeabilitenin basınç kademelerine göre değişimi

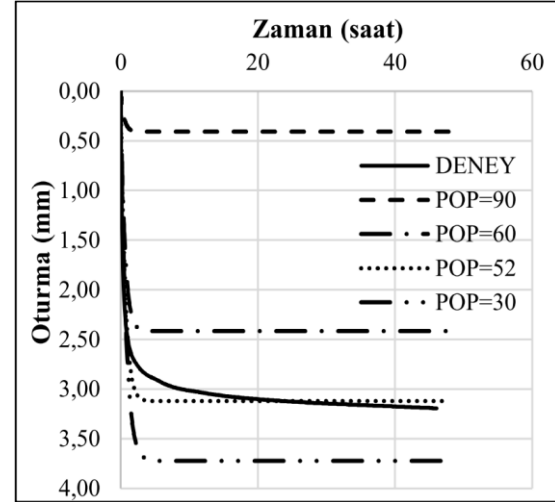
Permeabilitenin zemin davranışına etkisini araştırmak için farklı basınç kademelerinde sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde permeabilitenin artması ile oturmaların hızlandığı görülmektedir. Tipik karşılaştırma eğrilerinden biri Şekil 8'de görülmektedir. Sayısal analizler ile elde edilen sonuçlar klasik laboratuvar konsolidasyon deney sonuçlarına benzer olup, basınç kademesinin artması ile permeabilitenin azaldığı tespit edilmiştir. Elde edilen en önemli sonuçlardan biri de laboratuvar deneylerinden elde edilen permeabilite değerlerinin parametrik olarak elde edilen değerlere oldukça yakın olmasıdır. Başka bir ifade ile kurulan sayısal model gerçek koşullardaki zemin koşullarını doğru temsil etmektedir. Tüm basınç kademeleri için yapılan çalışmalar sonucunda 50-100 kPa basınç kademesi

için kullanılan permeabilite değeri $2,8 \times 10^{-4}$ m/gün, 100-150 kPa basınç kademesi için $1,0 \times 10^{-4}$ m/gün, 150-200 kPa basınç kademesi için $9,0 \times 10^{-5}$ m/gün olarak belirlenmiştir.



Şekil 8. Permeabilitenin etkisi (150-200 kPa basınç kademesi)

konsolidasyon basıncının artmasıyla zamana bağlı meydana gelen oturmaların azaldığı görülmektedir. Analiz sonuçları ile POP=52 değerinin model deney ile uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 9. POP değerinin etkisi (50-100 kPa basınç kademesi)

5.2. POP (Pre-Overburden Pressure) Etkisi

POP, zeminin aşırı konsolidasyon oranının alternatif bir gösterimidir (Eşitlik 5) ve ön konsolidasyon basıncını temsil etmek için kullanılır. Plaxis programı ile yapılan sayısal analizlerde ileri düzey zemin modellerinin (Hardening soil model, Soft Soil model, Soft Soil Creep model, Modifiye Cam Kili modeli, Sekiguchi-Ohta model) kullanılması durumunda ön konsolidasyon basıncının kullanılması gerekmektedir.

$$POP = \left| \sigma_p - \sigma_{yy}^0 \right| \quad (5)$$

σ_p : Düşey ön konsolidasyon gerilmesi

σ_{yy}^0 : Arazi koşullarındaki düşey efektif gerilme

POP parametresinin zemin davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek için değişen POP değerleri ile sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve o basınç kademesindeki laboratuvar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tipik karşılaştırma eğrilerinden biri Şekil 9'da verilmiştir. POP değerinin yani ön

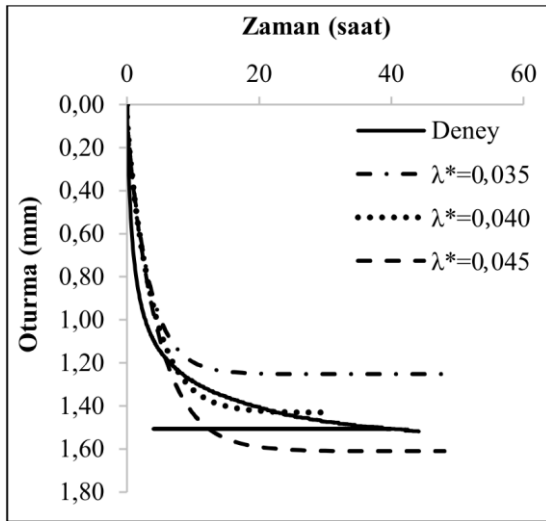
5.3. Modifiye Sıkışma İndisi Etkisi

Modifiye Sıkışma İndisi (λ^*) bir boyutlu sıkışma deneylerinden elde edilen ve doğal sıkışma eğrisinin eğimi olarak tanımlanan λ sıkışma indisine bağlı olarak elde edilebilir (Eşitlik 6). λ sıkışma indisi esas olarak zeminin nihai oturma değerini önemli derecede etkilemektedir.

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1 + e} \quad (6)$$

Yumuşak zemin için yapılan klasik laboratuvar konsolidasyon deneylerinden elde edilen λ^* değerleri esas alınarak, değişen λ^* değerleri ile sayısal parametrik araştırmalar yapılmıştır. Parametrik çalışma sonuçları laboratuvar deney sonucu ile karşılaştırılmıştır (Şekil 10). λ^* parametresinin artması ile nihai oturma miktarının önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Model deneyde birincil konsolidasyon oturmalarının tespiti için yapılan yük kademelerindeki basınç değeri, zemine yeniden yapı kazandırmak için uygulanan ön konsolidasyon basıncından daha büyük olduğu için

zemin sıkışma yönünde hareket edecektir. Bu durumda λ^* parametresi deney davranışında önemli bir etkiye sahip olacaktır. Çalışma ile deney sonucuna en yakın oturma değeri $\lambda^*=0,04$ değeri ile elde edilmiştir. Burada elde edilen önemli sonuçlardan biri de tespit edilen bu değer ($\lambda^*=0,04$) klasik laboratuvar konsolidasyon deneyinden elde edilen değer ile aynı olmasıdır.



Şekil 10. Modifiye sıkışma indisi etkisi (150-200 kPa basınç kademesi)

5.4. Modifiye Şişme İndisi Etkisi

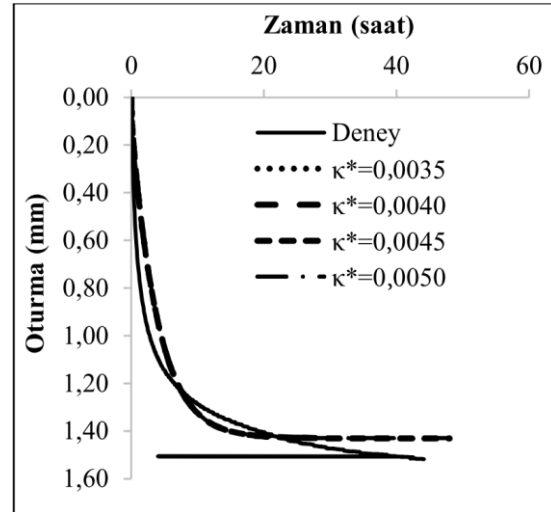
Zeminin şişme eğrisinin eğimi Modifiye Şişme İndisi (κ^*) olarak tanımlanmaktadır. Bu parametre bir boyutlu sıkışma deneylerinden elde edilebilmektedir (Eşitlik 7).

$$\kappa^* = \frac{\kappa}{1 + e} \quad (7)$$

e : Zeminin boşluk oranı

Bu bölümde κ^* Modifiye Şişme İndisi değerinin zemin davranışına etkisi sayısal analizler yardımı ile araştırılmıştır. Farklı yükleme kademelerinde gerçekleştirilen analizlerden tipik bir eğri Şekil 11’de verilmiştir. Analizler ile değişen κ^* değerlerinin birincil konsolidasyon oturmalarına herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Laboratuvar model deneyinin yükleme kademelerinde zeminde sıkışma yönünde hareket olduğu için κ^* parametresinin herhangi bir etkisi olmayacaktır. Bu durumda esas parametre λ sıkışma indisidir. Tüm analizlerde $\kappa^*=0,0040$ değeri kullanılmıştır.



Şekil 11. Şişme indisi etkisi (150-200 kPa basınç kademesi)

Yumuşak zemin için gerçekleştirilen standart laboratuvar deneyleri ve sayısal parametrik çalışmalar ile belirlenen zemin parametreleri Çizelge 1’de verilmiştir. Bu zemin ile gerçekleştirilecek sayısal analizlerde tespit edilen zemin model parametreleri kullanılmalıdır.

Çizelge 1. Zemin parametreleri

Zemin Parametreleri	Parametre Değerleri
Y_{unsat} (kN/m ³)	16,5
Y_{sat} (kN/m ³)	17,3
E' (kN/m ²)	-
ν'	-
c' (kN/m ²)	20
ϕ'	35
ψ	0
λ^*	0,04
κ^*	0004
POP	52
K_0	-

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yumuşak kilin birincil konsolidasyon davranışı büyük ölçekli bir laboratuvar oedometre deneyi kullanılarak incelen ve model zemin parametrelerinin yumuşak zemin davranışına etkisini değerlendirmek için oedometre deneyinin sayısal olarak simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler, Plaxis 2D sonlu eleman programı ile gerçekleştirilmiş olup, analizlerde klasik laboratuvar deneylerinden elde edilen zemin parametreleri kullanılmıştır. Sayısal analiz sonuçları laboratuvar deney gerçekleştirilen model deney sonuçları ile karşılaştırılarak analiz sonuçlarının deney eğrisine yakınlığı araştırılmıştır. Çalışma ile elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Permeabilitenin artması ile oturmaların hızlandığı tespit edilmiştir. Farklı basınç kademelerinde gerçekleştirilen analizler değerlendirildiği zaman, klasik laboratuvar konsolidasyon deneylerine benzer olarak, basıncın artması ile permeabilite değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Tespit edilen en önemli sonuçlardan biri de laboratuvar deneylerinden elde edilen permeabilite değerleri ile parametrik olarak elde edilen değerlerin birbirine oldukça yakın olmasıdır. Bu durum sayısal modelin doğru oluşturulduğunu göstermektedir.

POP değerinin yani ön konsolidasyon basıncının artması ile zamana bağlı meydana gelen oturmaların azaldığı görülmektedir. Analiz sonuçları ile POP=52 değerinin laboratuvar model deney ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Modifiye Sıkışma İndisi (λ^*) parametresinin artması ile oturmaların önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Model deney sonucuna en yakın değerin $\lambda^*= 0,04$ olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen önemli sonuçlardan biri de sayısal analizler yardımı ile tespit edilen sıkışma indisi değerinin ($\lambda^*= 0,04$) klasik laboratuvar konsolidasyon deneyinden elde edilen değer ile aynı olmasıdır.

Modifiye Şişme İndisi (κ^*) etkisi incelendiğinde, zemin sıkışma yönünde hareket ettiği için bu parametrenin (κ^*) herhangi bir etkisi

görülmemiştir. Analizlerde klasik laboratuvar konsolidasyon deneylerinden elde edilen $\kappa^*= 0,0004$ değeri kullanılmıştır.

7. KAYNAKLAR

1. Plaxis, 2012. Plaxis 2D - Reference Manual 2012. Plaxis B.V, Delft, Netherlands.
2. Bjerrum, L., 1967. Engineering Geology of Norwegian Normally Consolidated Marine Clays as Related to Settlement of Buildings. Geotechnique, 17, 81-118.
3. Vaid, Y.P., Campanella, R.G., 1977. Time-dependent Behaviour of Undisturbed Clay, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 103(7), 693-709.
4. Graham, J., Crooks, J.H.A., Bell, A.L., 1983. Time Effects on the Stress-strain Behaviour of Natural Soft Clays. Geotechnique, 33(3), 327-340.
5. Sheahan, T.C., Ladd, C.C., Gernaine, J.T., 1996. Rate-dependent Undrained Shear Behavior of Saturated Clay, Journal of Geotechnical Engineering, 122, 99-108.
6. Yin, J.H., Cheng, C.M., 2006. Comparison of Strain-rate Dependent Stress-strain Behaviour from K0-consolidated Compression and Extension Tests on Natural Hong Kong Marine deposits. Marine Georesources and Geotechnology 24 (2), 119-147.
7. Roscoe, K.H., Schofield, A.N., 1963. Mechanical Behaviour of an Idealised, Wet-Clay. 2nd ECSMFE, 1, 47-54.
8. Roscoe, K.H., Burland, J.B., 1968. On the Generalized Stress-strain Behaviour of Wet Clay. In Engineering Plasticity, eds. J. Heyman and F.A. Leckie, 535-609. Cambridge, England.
9. Burland, J.B., 1965. Some Aspects of the Mechanical Behaviour of Partly Saturated Soils, Moisture Equilibrium and Moisture Changes in Soil Beneath Covered Areas, Australia, Butterworth.
10. Neher, H.P., Wehnert, M., Bonnier, P.G., 2001. An Evaluation of Soft Soil Models Based on Trial Embankment. In C.S. Desai (Ed), Computer Methods and Advances in Geomechanics, TUSCOM, Arizona, 1, 373-378. A.A. Balkema.

11. Muir Wood, D., Hu, W., Nash, D.F.T., 2000. Group Effects in Stone Column Foundations: Model Tests. *Geotechnique*, 50(6), 689–698.
12. Bin Hasan, M., Binti Marto, A., Hyodo, M., Bin Makhtar, A.M., 2011. The Strength of Soft Clay Reinforced with Singular and Group Bottom Ash Columns. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 16 N. 1215-1227. ISSN 1089-3032.
13. Frikha, W., Bouassida, M., Canou, J., 2014. Parametric Study of a Clayey Specimen Reinforced by a Granular Column. *Int. J. Geomech.*, 10.1061/(ASCE) GM.1943-5622. 0000419, 04014078.
14. Cimentada, A., Da Costa, A., Cañizal, J., Sagaseta, C., 2011. Laboratory Study on Radial Consolidation and Deformation in Clay Reinforced with Stone Columns. *Can Geotech J*; 48(1), 36–52.
15. Brinkgreve, R.B.J., 2002. *Plaxis Manual*. Rotterdam, Balkema.

